

# PLATAFORMA IoT PARA EL CONTROL Y MONITOREO DE VARIABLES FÍSICAS CON TECNOLOGÍA OPEN HARDWARE

**Carlos Levi Cartagena Lobos**

Ingeniero Industrial. Docente Investigador Escuela de Ingeniería Eléctrica. Escuela Especializada en Ingeniería ITCA-FEPADE, Centro Regional Santa Ana.  
Email: carlos.cartagena@itca.edu.sv

**Ricardo Edgardo Quintanilla Padilla**

Ingeniero en Ciencias de la Computación. Docente Investigador Escuela de Computación. Escuela Especializada en Ingeniería ITCA-FEPADE, Centro Regional Santa Ana.  
Email: repadilla@itca.edu.sv

Recibido: 27/03/2019 - Aceptado: 09/04/2019

## Resumen

El control y monitoreo de variables físicas en tiempo real es de vital importancia en la industria para garantizar la calidad de los productos, la seguridad industrial, el funcionamiento correcto de las máquinas y procesos de fabricación. En la actualidad la industria salvadoreña debe adoptar tecnologías asociadas al Internet de las Cosas. Entendiendo al internet de las cosas como dotar de conectividad a internet a cualquier objeto sobre el que se pueda medir parámetros físicos o manipular remotamente. Para que la industria no se quede rezagada y sea competitiva a nivel internacional. En este sentido, por la importancia que representa el control y monitoreo de variables físicas en la industria, en el Centro Regional de ITCA-FEPADE Santa Ana, se diseñó e implementó una plataforma IoT para el monitoreo de variables físicas con fines didácticos. Para el diseño de la plataforma se utilizaron herramientas de software y hardware abierto tales como el microcontrolador ATmega 328p, antenas XBee, lenguajes de programación C, PHP y Java. Esta plataforma IoT permite el control de cargas eléctricas y el monitoreo de variables tales como: corriente eléctrica, potencia eléctrica, energía eléctrica y temperatura de áreas específicas de la institución. Para efectos de muestreo se eligieron el Centro de Cómputo 2 y el Aula 103. La plataforma permite visualizar y controlar variables físicas desde un smartphone, una computadora o una tablet que estén conectados a la Red del Centro Regional de ITCA-FEPADE Santa Ana.

## Palabras clave

Redes inalámbricas, Internet de las Cosas, IoT, herramientas open-source, ZigBee, soporte lógico de computadores.

## IoT PLATFORM FOR THE CONTROL AND MONITORING OF PHYSICAL VARIABLES WITH OPEN HARDWARE TECHNOLOGY

## Abstract

The control and monitoring of physical variables in real time is very important to the industry to guarantee the quality of products, industrial safety, the operation of the machines and the manufacturing process. Nowadays, the Salvadoran industry must adopt technologies associated with the Internet of Things. Understanding Internet of Things as the possibility to provide internet connection to any object which makes possible to measure physical parameters or controlling remotely and as a help to the industry to stay in touch and be competitive at international levels, at Centro Regional ITCA-FEPADE Santa Ana was designed and implemented an IoT platform to monitor the physical variables with educational purposes. Some hardware and software open source tools like ATmega 328p microcontroller, XBee antennas, PHP, Java and C programming languages were used for the design of the platform. This IoT platform can control the electric charges and monitoring variables of a specific area like: electric current and power, electrical energy and temperature. For statistical measurement the computer center 2 and classroom 103 were chosen. For the use of this software, the user just needs a smartphone, a computer or a tablet to connect to the IoT platform. The user can visualize and have control of physical variables using the platform interface. Both devices (user device and the server) must be connected to the same network, in this case ITCA-FEPADE Santa Ana's network.

## Keyword

Wireless networks, Internet of Things, IoT, open-source tools, ZigBee, computer software.

## Introducción

El Internet de las Cosas IoT, por sus siglas en inglés, se orienta a la interconexión de los objetos de uso diario con la World Wide Web, WWW, término acuñado por Kevin Ashton en 1999 [1]. Estos objetos se conectan entre sí utilizando sensores, actuadores y controladores.

El IoT se está integrando de manera muy rápida en la sociedad; basta con ver la cantidad de elementos que se encuentran para la solución de problemas diarios.

En el área industrial el IoT es la columna vertebral para la implementación de la Industria 4.0, la cual describe cómo los procesos industriales pueden llegar a ser digitalizados e interconectados entre ellos. Este término fue acuñado en el año 2011 en Alemania en la Feria Industrial de Hannover por los profesores Henning Kagermann, físico ex director de SAP AG y Wolfgang Wahster, del Centro Alemán de Inteligencia Artificial, DFKI [1].

El IoT está evolucionando debido a las nuevas tecnologías y al mejoramiento de las interconexiones de los dispositivos; la fabricación de nuevos sensores encapsulados de pequeñas dimensiones ayuda a que su difusión y puesta en marcha sea cada vez más fácil.

A nivel mundial, Alemania es uno de los países pioneros en el desarrollo de tecnologías del IoT para la Industria 4.0, con el soporte de empresas tecnológicas de gran peso industrial, SAP, Bosch, Siemens, Festo, entre otras [1]. En El Salvador, el IoT es una tecnología poco desarrollada, la cual requiere de mayor difusión en el entorno académico e industrial para encontrar aplicaciones innovadoras que mejoren la competitividad del país a nivel mundial.

Este proyecto es un esfuerzo para comprender el funcionamiento y las aplicaciones potenciales de esta tecnología. Se ha diseñado y construido una plataforma IoT utilizando herramientas de software y hardware libre para el control y la medición de variables físicas tales como: temperatura, corriente eléctrica, potencia eléctrica y energía eléctrica. La implementación de la plataforma IoT se ha realizado en el Centro de Cómputo 2 y el Aula 103 del Centro Regional Santa Ana de ITCA-FEPADE.

## Estado de la técnica

### Protocolo ZigBee (IEEE 802.15.4)

ZigBee es una tecnología inalámbrica de corto alcance y bajo consumo eléctrico, que surge de la antigua alianza HomeRF y que se define como una solución inalámbrica de baja capacidad

para aplicaciones en el hogar, tales como la seguridad y la automatización [2]

Entre las aplicaciones que puede tener están:

- Domótica.
- Automatización industrial.
- Reconocimiento remoto.
- Juguetes interactivos.
- Medicina.
- Otros.

El objetivo de esta tecnología no es obtener velocidades muy altas, ya que solo puede alcanzar una tasa de 20 a 250 Kbps en un rango de 10 a 75 metros, sino que es contar con sensores cuyos transceptores tengan un bajo consumo energético. De hecho, algunos dispositivos alimentados con dos pilas AA pueden durar 2 años sin el cambio de éstas. Por tanto, dichos dispositivos pasan la mayor parte del tiempo en un estado latente para consumir menos energía.

### Bandas de operación

ZigBee opera en las bandas libres de 2.4 Ghz, 858 Mhz para Europa y 915 Mhz para Estados Unidos. En la siguiente figura se puede ver el espectro de ocupación en las bandas del protocolo 802, incluyendo ZigBee 802.15.4.

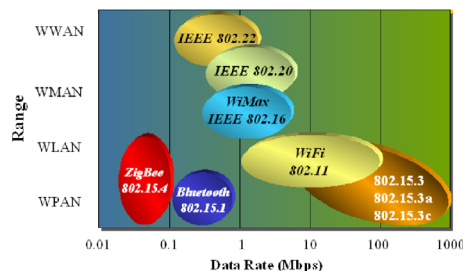


Figura 1. Tecnologías en 2.4 GHz.

En la banda de 2.4 GHz usa la modulación de espectro expandido DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum). A una velocidad de transmisión de 250 Kbps y a una potencia de 1 mW cubre aproximadamente unos 13 metros de radio [2].

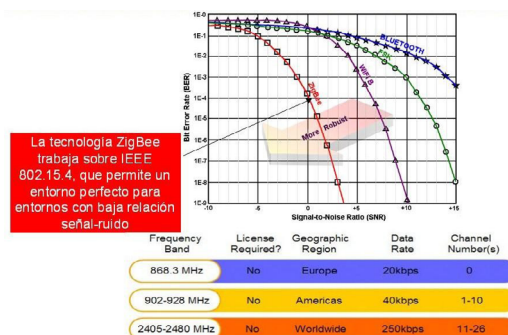


Figura 2. Características de radio.

En la Tabla 1 se puede observar la distancia en función de la potencia transmitida y la velocidad de transmisión.

Tabla 1. Distancia de transmisión.

Potencia (mW) / Velocidad (Kbps)	1mW	10mW	100mW
28 Kbps	23 m	54 m	154 m
250 Kbps	12 m	29 m	66 m

En cuanto a la gestión del control de acceso al medio hace uso de CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Acces with Collision Avoidance) y es posible usar ranuras temporales TDMA (Time Division Multiple Access) para aplicaciones de baja latencia.

### Nodos y topología de red

En una red ZigBee pueden haber hasta 254 nodos, no obstante, según la agrupación que se haga, se pueden crear hasta 255 conjuntos/clusters de nodos, con lo cual se puede llegar a tener 64770 nodos con la posibilidad de utilizar varias topologías de red: en estrella, en malla o en grupos de árboles, como puede verse a continuación [2]:

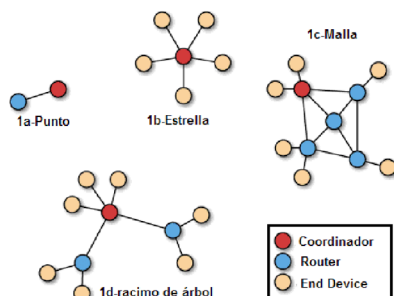


Figura 3. Modelos topología de red.

Se permite un encaminamiento o enrutamiento de saltos múltiples, también conocido como multi-hop, que hace posible que estas redes abarquen una gran superficie.

En ZigBee hay tres tipos de dispositivos:

#### → Coordinador

1. Sólo puede existir uno por red.
2. Inicia la formación de la red.
3. Es el coordinador de Red de Área Personal, PAN.

#### → Router

1. Se asocia con el coordinador de la red o con otro router ZigBee.
2. Puede actuar como coordinador.
3. Es el encargado del enrutamiento de saltos múltiples de los mensajes.

#### → Dispositivo final

1. Elemento básico de la red.
2. No realiza tareas de enrutamiento.

## Metodología de investigación

Para el desarrollo del proyecto “Plataforma IoT para el Control y Monitoreo de Variables Físicas con Tecnología Open Hardware”, se utilizó el diseño experimental llevando a cabo las siguientes actividades:

1. Diseñar los módulos hardware para la medición y control de variables físicas. En esta etapa se realizaron las siguientes tareas:
  - a. Diseño de los circuitos esquemáticos.
  - b. Diseño y construcción de circuito impreso (PCB).
  - c. Montaje de los componentes electrónicos.
  - d. Programación de firmware en lenguaje C [3].
  - e. Pruebas locales.
2. Implementar una plataforma en la nube basada el IoT. Para esta fase se obtuvieron los siguientes resultados [4]:
  - a. Base de datos de la plataforma IoT.
  - b. Plataforma IoT para el control y monitoreo de las variables físicas.
3. Implementar una red inalámbrica utilizando el protocolo de comunicación 802.15.4 para ZigBee.
4. Reacondicionar la red eléctrica en las áreas específicas seleccionadas del Centro Regional.

## Resultados

### RED PAN (Personal Area Network)

Se diseñó una red PAN (Personal Área Network) bajo el protocolo ZigBee (802.15.4), utilizando antenas XBee conectadas en red con topología tipo estrella y configuración punto a multipunto. La red PAN se conecta con una red LAN (Local Área Network) a través de una puerta de enlace para que los datos sean distribuidos a través de Internet. El diseño global de la red para la plataforma IoT se muestra en la figura 4.

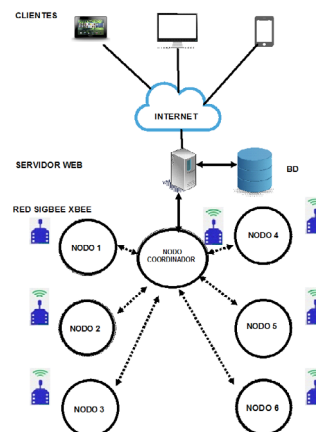


Figura 4. Arquitectura de red para la plataforma IoT.

Cada nodo de la red PAN está compuesto por hardware embebido, diseñado especialmente para el control de cargas y medir las siguientes variables físicas:

- Corriente alterna.
- Potencia eléctrica aparente.
- Energía eléctrica.
- Temperatura ambiente.

La arquitectura de hardware utilizada para la recolección y transmisión de datos se muestra en la figura 5

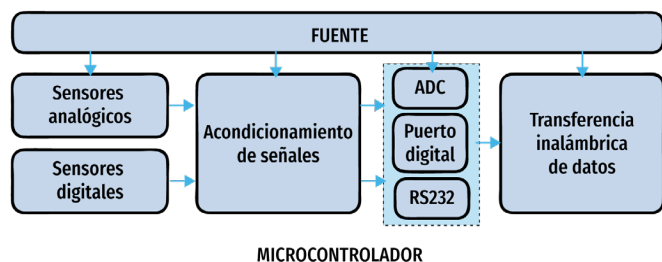


Figura 5. Diagrama de bloques del hardware embebido.

#### Tarjeta para monitor de energía eléctrica (PWRMONTX\_V2)

Se diseñó y construyó la tarjeta PWRMONTX\_V2, Fig.6, la cual cuenta con las siguientes características:

- ▶ Tiene cuatro puertos con conectores tipo Jack de audio de 3.5 mm.
- ▶ La interfaz para el acondicionamiento de señales está diseñada para que se puedan utilizar los sensores SCT013-30 y el SCT13-100.
- ▶ La unidad de cálculo es un microcontrolador Atmega 328P [5]
- ▶ Comunicación inalámbrica con antena XBee.
- ▶ Capacidad máxima de medida usando sensores SCT13-100 es de 400A.
- ▶ Capacidad máxima de medida usando sensores SCT13-30 es de 120A.

Las aplicaciones potenciales de la tarjeta son:

- Medir el consumo eléctrico en una instalación eléctrica de baja tensión.
- Comprobar el estado de una instalación eléctrica.
- Obtener patrones de consumo.
- Monitorear el desbalance de carga en tiempo real para instalaciones eléctricas de baja tensión.

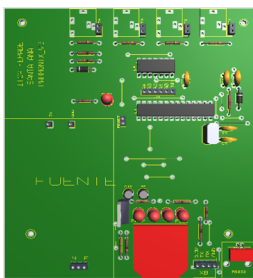


Figura 6. Tarjeta para el monitoreo de la energía eléctrica.

#### Tarjeta para el manejo de cargas eléctricas (POWERCONTROL\_V1)

La tarjeta POWERCONTROL\_V1, Fig. 7, tiene las siguientes características:

- ◆ Utiliza salidas de relé con capacidad de manejar cargas de hasta 10A (250V/125V) con corriente alterna y 10A (30V/28V) con corriente directa.
- ◆ Comunicación inalámbrica con antena XBee.

Las aplicaciones potenciales de la tarjeta son:

- Control remoto de cargas que funcionan con corriente AC.
- Control remoto de cargas que funcionan con corriente DC.

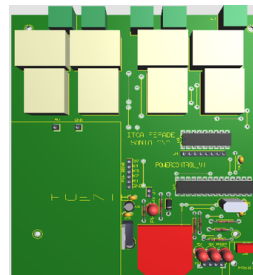


Figura 7. Tarjeta para el control de carga.

#### Tarjeta para la medición de la temperatura (TMONTX\_V1)

La tarjeta TMONTX\_V1, Fig. 8, tiene las siguientes características:

- » Integra dos puertos que permiten conectar sensores de temperatura del tipo DS18B20 con el que se pueden medir temperatura desde los -55°C hasta los 125°C.
- » Comunicación inalámbrica con antena XBee.
- » Un puerto digital para conectar un sensor PIR.

Se puede utilizar para:

- Monitorear la temperatura ambiente.
- Estudios de aislamiento térmico de diferentes tipos de materiales.
- Realizar estudios de la eficiencia energética de los sistemas de climatización, en conjunto con la tarjeta PWRMONTX\_V2, figura 6.

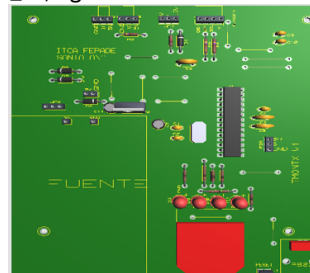


Figura 8. Tarjeta para el monitoreo de temperaturas.

#### Funcionamiento global del sistema

Este sistema permite visualizar el consumo eléctrico del local bajo control, la temperatura tanto en el interior como el exterior, además de permitirle a una persona encargada

encender y apagar los dispositivos de forma remota.  
El sistema está compuesto por tres partes principales:

- Red ZigBee XBee
- Servidor Web.
- Clientes.

**Red ZigBee XBee:** Es una red inalámbrica que funciona bajo el protocolo 802.15.4; está integrada por un nodo coordinador y seis nodos de dispositivo final. El nodo coordinador se encarga de coordinar la comunicación entre los diferentes elementos de la red PAN, los nodos de dispositivo final capturan la información proveniente de los sensores de corriente y temperatura, luego la transmiten al nodo central.

**Servidor Web:** El servidor Web toma la trama de datos del nodo coordinador y los almacena en una base de datos. En el servidor corre un programa desarrollado en el lenguaje PHP, el cual hace posible que los datos estén disponibles en Internet o red local.

**Cliente:** Es el usuario de los datos que mediante una conexión a Internet o red local usando diferentes dispositivos como PC, smartphones y tablets, puede visualizar la información de los diferentes sensores y realizar acciones de control como activar o desactivar cargas remotamente.

### Monitoreo de la energía eléctrica

El monitoreo de la energía eléctrica se realiza con la tarjeta PWRMONTX\_V2, Fig.6, usando los sensores de la serie SCT13.

Para realizar la medición se resolvieron cuatro problemáticas:

- » Salida del sensor en intensidad.
- » Adaptación de rango de tensión.
- » Procesamiento con el microcontrolador Atmega 328p.
- » Visualización.

#### Salida del sensor en intensidad

El SCT-013 son transformadores de intensidad, es decir, la medición se obtiene como una señal de intensidad proporcional a la corriente que circula por el cable. Pero los microcontroladores solo son capaces de medir tensiones. Este problema es sencillo de resolver. Para convertir la salida en intensidad en una salida de tensión, únicamente se incluye una resistencia Burden.

Excepto el modelo SCT-013-100, todos los demás modelos tienen una resistencia Burden interna para que la salida sea una señal de tensión de 1V.

Únicamente el caso SCT-013-100, carece de resistencia Burden interna, por lo que la salida es una señal de  $\pm 50\text{mA}$ . Una resistencia de  $33\Omega$  en paralelo con el sensor es suficiente.

#### Adaptación de rango de tensión

Otro problema que se resolvió es que se está midiendo corriente alterna, y la intensidad inducida en el secundario es igualmente alterna. Tras el paso por la resistencia Burden (interna o externa) la salida de tensión también es alterna. Sin embargo, como se sabe, las entradas analógicas de la mayoría de los microcontroladores, sólo pueden medir tensiones positivas.

Para poder medir las tensiones de la salida del transformador, se agregó un amplificador operacional como seguidor de tensión para acondicionar las señales leídas por el microcontrolador.

#### Procesamiento con el microcontrolador Atmega 328p

Como la fuente de la señal es corriente alterna, usando el microcontrolador se obtiene el valor RMS con la siguiente fórmula:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad \text{En tiempo discreto:} \quad I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^N i_n^2}$$

Donde:

- N es la cantidad de muestras en un período o múltiplo de éste.
- I es la corriente RMS.
- $i_n$  es la corriente instantánea.

Con esta fórmula se obtiene el valor RMS y usando un voltaje promedio de 120V, se calculó la potencia usando la siguiente fórmula:

$$P = I * 120$$

Donde:

- P es la potencia eléctrica aparente.
- I es la corriente RMS.
- 120 es el voltaje RMS.

Cuando el microcontrolador ha realizado todos los cálculos, los datos resultantes se agrupan en una cadena ASCII y se envían al servidor.

#### Visualización

Los datos que la tarjeta PWRMONTX\_V2 envía son capturados, clasificados y almacenados en una base de datos del servidor local. La visualización de los resultados se aprecia en las siguientes figuras:





Figura 9. Gráfico de potencia eléctrica para cuatro cargas en el Centro de Cómputo 2 (CC2).



Figura 10. Gráfico de corriente eléctrica para cuatro cargas en el Centro de Cómputo 2 (CC2).

## Monitoreo de la temperatura

El monitoreo de la temperatura se realizó con la tarjeta TMONTX\_V1, Fig.8, usando el sensor DS18B20.

Los sensores DS18B20 proporcionan una señal digital, por lo que el microcontrolador no requiere del proceso de conversión de analógico a digital. Los datos capturados se envían al servidor en formato ASCII para ordenarlos y almacenarlos.

El proyecto permite únicamente visualizar las temperaturas, pues todavía no se han programado acciones específicas. Los gráficos de temperatura que el usuario puede visualizar se muestran en las siguientes imágenes.



Figura 11. Gráfico de temperatura en el exterior del CC2.

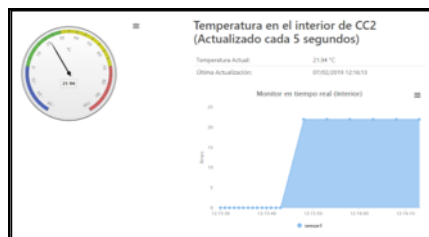


Figura 12. Gráfico de temperatura en el interior del CC2.

## Control de cargas

El control de cargas se realiza con la tarjeta POWERCONTROL\_V1, figura 7. La acción de apagar o encender una carga se puede efectuar de forma remota y manual; cada tarjeta se diseñó para controlar cuatro cargas.

En el monitor de cargas se puede visualizar el estado de las cargas en tiempo real. A continuación se muestran imágenes que el usuario visualiza en la pantalla del dispositivo móvil o computadora.

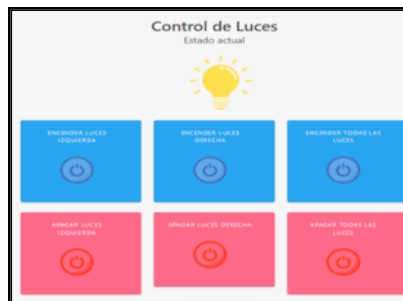


Figura 13. Panel de control de luces del CC2.



Figura 14. Panel de control de tomas y aire acondicionado del CC2.

El sistema fue instalado en el Aula 103 y el Centro de Cómputo 2 del Centro Regional de ITCA - FEPADE Santa Ana. El montaje se puede apreciar en las siguientes figuras.



Figura 15. Instalación en el Aula 103.



Figura 16. Instalación en el Centro de Cómputo 2.

## Conclusiones

- a. Los resultados obtenidos en este proyecto muestran que es posible obtener información en tiempo real de variables físicas de forma remota.
- b. Existe un tiempo de latencia desde que los sensores captan las señales, más el procesamiento embebido, transmisión de tramas, almacenamiento en base de datos y muestra de resultados en pantalla en cada etapa del proceso.
- c. Para construir una estructura flexible, mecánica y electrónica capaz de integrar los elementos en un espacio más reducido, se requiere de equipo sofisticado, preciso y de calidad.
- d. Basándonos en la experiencia la tarjeta de control de carga PWRMONTX\_V2 diseñada, se verificó que hay fluctuaciones electromagnéticas ocasionadas por los relés afectando al microcontrolador el cual pierde la sincronía; para que recupere el funcionamiento normal se debe reiniciar.
- e. Para poder integrar las tarjetas a los circuitos eléctricos de las áreas, se deben usar elementos electromecánicos como relés y contactores tomando en cuenta las corrientes de las cargas a controlar y la flexibilidad para tener un control manual y automático.
- f. La red PAN es un tipo de red que con tecnología basada en el protocolo ZigBee es ideal para poder implementar soluciones orientadas al Internet de las Cosas; ya que los sensores no demandan un gran ancho de banda.

## Recomendaciones

- Se recomienda que la Plataforma IoT desarrollada en el Centro Regional de Santa Ana sea capaz de utilizar la información visualizada en tiempo real para la toma de decisiones a través de actuadores y controladores.
- Los resultados obtenidos establecen las bases y forman un precedente para futuros proyectos similares.
- Para construir una estructura flexible, mecánica y electrónica capaz de integrar los elementos en un espacio más reducido, se requiere de equipo sofisticado, preciso y de calidad.

## Referencias

- [1] L. Joyanes Aguilar, Industria 4.0 la cuarta revolución industrial. México: Alfaomega, 2017.
- [2] I. Romero (14 septiembre del 2015). Zigbee in Space: XBee RF Modules launched by NASA. Zegbee Alliance.[Online]. Available: <https://www.zigbee.org/zigbee-in-space-xbee-rf-modules-launched-by-nasa/>. [Accessed: 12-feb-2019]
- [3] J. R. Lajara Vizcaino y J. Pelegrí Sebastiá, Sistemas integrados con Arduino. México, D.F. : Alfaomega, 2014.
- [4] L. Joyanes Aguilar, Computación en la nube: estrategias de Cloud Computing en las empresas. México: Alfaomega, 2012.
- [5] F. Reyes Cortés, y J. Cid Monjaraz. Arduino: aplicaciones en robótica mecatrónica e ingenierías. México D.F: Alfaomega, 2015.